



TITLE:

高炉溶銑温度制御システムの実用化に関する研究(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

橋本, 佳也

CITATION:

橋本, 佳也. 高炉溶銑温度制御システムの実用化に関する研究. 京都大学, 2019, 博士(情報学)

ISSUE DATE:

2019-09-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k22098>

RIGHT:

許諾条件により本文は2020-04-01に公開

(続紙 1)

京都大学	博士（情報学）	氏名	橋本 佳也
論文題目	高炉溶銑温度制御システムの実用化に関する研究		
(論文内容の要旨)			
<p>製鉄業における溶銑炉（以下、高炉と記す）では、現在でも運転員のノウハウに依存したマニュアル操作が行われており、自動制御による高効率かつ安定な操作の実現が望まれている。本研究は、高炉の運転自動化の足掛かりとなる、溶銑温度制御のガイダンスシステムの実用化に関するものである。高炉は熱容量が大きく、操作変数の変更に対する溶銑温度の応答の時定数が長いという特徴がある。このため、溶銑温度の将来予測に基づいて適切な操作量を算出する必要がある。本論文では、物理モデルに基づく非線形モデル予測制御を用いた高炉操業ガイダンスシステムの構築と実用化について論述している。</p> <p>第1章では、溶銑温度制御の必要性、従来の温度制御へのアプローチを説明した後、本研究の目的および位置付けを明確化している。時定数の長い高炉を制御するためには8時間以上先の将来予測を伴う制御則が有効であり、非定常物理モデルを用いたモデル予測制御を採用することが述べられている。</p> <p>第2章では、高炉プロセスの炉内現象および本論文中で頻出する主要な炉内プロセス変数について説明している。</p> <p>第3章では、二次元非定常モデルの構築方法、および1ヶ月に渡る長期データによるモデル精度の検証結果が示されている。特にリスト線図を用いてプロセスの熱物質収支の観点からモデル化誤差の要因を考察し、モデルパラメータの調整指針を明確化している。その結果、化学保存帯の存在および炉下部の熱収支を適切に考慮することが、モデルによる実現象の再現のために有効であることを明らかにしている。さらに、過渡状態における計算精度を向上させるため、数値拡散の影響を受けない固体流れのモデル化手法を考案している。これにより、原料が層状構造を保ったまま炉内を降下する過程を忠実に再現することが可能となり、コークス比変更時の過渡応答の計算精度が向上した。</p> <p>第4章では、非定常モデルを長期に渡り継続してモデル予測制御に活用するため、外乱に起因する推定誤差を低減するための手法を検討している。推定誤差の要因を主成分分析とリスト線図を用いて解析した結果、推定誤差の主要因は還元材比の誤差とシャフト効率の誤差に集約されることを明らかにした。また推定誤差を低減するために有効なモデル内の未知パラメータとして、コークス比の補正パラメータ、ガス還元平衡パラメータ、ヒートロス補正パラメータが選定された。高炉は時定数が長いいため、現時刻の推定誤差は過去に発生した外乱の蓄積により影響される。このため、Moving Horizon Estimation (MHE)により直近72時間分の主要プロセス変数の推定値が実績値に合致するように、過去に遡ってパラメータを逐次調整する手法が採用された。本手法により非定常モデルを用いた将来8時間先予測の長期オンライン化が可能となった。</p>			

第5章では、溶銑温度制御のための適切な操作変数を選択し、プロセスの非線形性に対応するために非線形モデル予測制御系を構築した。さらに非線形モデル予測制御に基づいた操業ガイダンスシステムを実プラントに実装し、本ガイダンスシステムにより推奨される微粉炭比の操作を行うことで、溶銑温度の制御偏差の根二乗平均が1.9℃低減する効果を確認した。

第3章から第5章までの検討により、①既往の制御システムでは一次元非定常モデルに留まっていたオンライン物理モデルを二次元非定常モデルに拡張し、②未知パラメータが多く存在する速度論的な高炉モデルのパラメータ調整指針を明確化し、③プロセスの外乱影響を適切に考慮した状態推定方法を開発し、④非線形モデル予測制御に基づいた操業ガイダンスの実機効果検証を行った。

今後は、本研究で構築した操業ガイダンスシステムを発展させて高炉操業の自動化を実現することが望まれる。そのためには、制御変数として溶銑温度だけでなく通気性や生産速度も考慮した制御則の導出が必要であり、それらの制御変数を予測するための手法を開発する必要がある。本研究で開発した物理モデルは通気性に大きな影響を与えるコークスの粉化や未燃微粉炭の発生などの現象を無視しており、開発の余地が残されている。また、製鉄所の核となる高炉の操業を完全自動化することは当面は困難と考えられ、人間の判断が介在する自動化の形態が望ましいと考えられる。このような人間中心の自動化を実現するには、運転員の操業感覚との親和性を高めることが重要である。現状の操業ではガイダンスシステムが推奨する操作の実施率は70%程度にとどまっているが、運転員の操業感覚を制御系に取り込んでいくことで実施率を改善していく必要がある。

注) 論文内容の要旨と論文審査の結果の要旨は1頁を38字×36行で作成し、合わせて、3,000字を標準とすること。

論文内容の要旨を英語で記入する場合は、400～1,100 wordsで作成し
審査結果の要旨は日本語500～2,000字程度で作成すること。

(論文審査の結果の要旨)

製鉄業における溶鋳炉（高炉）では現在も運転員のノウハウに依存したマニュアル操作が行われており，自動制御による高効率化と安定操作の実現が望まれている．本研究では，高炉プロセス自動制御化の足掛かりとなる溶銑温度制御ガイダンスシステムを，物理モデルに基づく非線形モデル予測制御を用いて構築し，実機にてその有用性を検証している．具体的には，以下に示す研究成果を得ている．

1. 非定常二次元モデルの開発

高炉物理モデル内に含まれる反応速度や熱交換速度に関わるパラメータについて，実炉の過渡状態を精度良く再現するための調整指針は明確化されていない．本研究では，非定常二次元モデルを構築し，熱物質収支の観点からモデル化誤差の要因を考察することで，パラメータの調整指針を明確化した．一ヶ月に渡る長期操作データを用いた検証の結果，化学保存帯の存在および炉下部の熱バランスを適切に考慮することが，実現象の再現に必要なことを明らかにした．

2. 状態推定手法の開発

長期に渡って物理モデルをプロセス制御に活用する際に，直接計測が困難な原料性状の変化等の外乱により推定誤差が発生するという課題がある．本研究では，リスト線図と主成分分析を用いて推定誤差の要因を解析し，推定誤差を低減するために有効な未知パラメータを選定した．さらに，Moving Horizon Estimationにより主要プロセス変数の推定値が実績値に合致するように，過去に遡って未知パラメータを逐次調整することで，長期間の高精度な溶銑温度予測を実現した．

3. 操業ガイダンスの実用化

これまでに種々の溶銑温度の予測手法が提案されているが，実プラントにおいて制御性能を検証した例は非常に少ない．本研究では，溶銑温度制御のために適切な操作変数を選択し，非線形モデル予測制御に基づいた操業ガイダンスシステムを実プラントに実装し，溶銑温度制御性能を検証した．開発したガイダンスシステムによって推奨される微粉炭比の操作を行うことで，溶銑温度のばらつきが1.9℃低減する効果を確認した．

以上を要するに，本論文は，高炉プロセス自動制御化の実現を目指して，非定常二次元物理モデルに基づく非線形モデル予測制御を用いた溶銑温度制御ガイダンスシステムを構築し，実際の高炉に適用することで，その有効性を実証しているものであり，その成果は学術上および実用上寄与するところが少なくない．

よって，本論文は博士（情報学）の学位論文として価値あるものとして認める．また，令和元年7月3日に論文内容とそれに関連した口頭試問を行った結果合格と認めた．

注) 論文審査の結果の要旨の結句には，学位論文の審査についての認定を明記すること．更に，試問の結果の要旨（例えば「平成 年 月 日論文内容とそれに関連した口頭試問を行った結果合格と認めた．」）を付け加えること．

Webでの即日公開を希望しない場合は，以下に公開可能とする日付を記入すること．
要旨公開可能日： 年 月 日以降